

ガスパイプライン異種ガス対応 非定常流送解析シミュレータの開発

Development of a Gas Quality-Tracking Simulator for Gas Pipeline Networks

山根総一郎 YAMANE Soichiro JFE 技研 エネルギー環境システム研究部 主任研究員(課長)
佐藤 律夫 SATO Ritsuo JFE エンジニアリング パイプラインシステム技術部流送設計室 課長

要旨

JFE エンジニアリングは、ガスパイプラインネットワークの異種ガストラッキングシミュレータ「Cosmos」を開発し、ガスパイプライン非定常流送シミュレーションシステム「Win GAIA[®]」の新機能としてラインアップした。新解法の採用により、高速なトラッキング解析を行うことができ、全長数千キロメートルにもおよぶ大規模なパイプラインネットワークに適用可能としている。本報告では、Cosmos の技術概要および解析事例について述べる。

Abstract:

JFE Engineering has developed the gas quality-tracking simulator, “Cosmos,” for gas pipeline networks, and added it to the computer modeling system, “Win GAIA[®],” to simulate the dynamic flow of gas in pipeline networks. By adopting a new method, Cosmos can be applied to the high-speed quality-tracking analysis of a large-scale pipeline network reaching several thousand kilometers. This paper describes the outline of Cosmos and examples of the analysis.

1. はじめに

近年、天然ガスを輸送する設備として欠かせないガスパイプラインは、天然ガスの利用増加にともない、設備やその運用が多様化かつ複雑化する傾向にある。

JFE エンジニアリングでは、このようなガスパイプラインの大規模ネットワーク化や運用の複雑化に対し、最適な建設計画の作成や安全かつ効率的な運転を支援する、高速解析シミュレータを中核としたガスパイプライン非定常流送シミュレーションシステム Win GAIA[®]を開発し¹⁾、エンジニアリングおよび稼働中のパイプラインに適用して効果を上げている。

一方、非定常流送解析の重要な適用先の例として、工事時のガスパーズ解析、稼働中のパイプラインにオフスペックガスが混入した場合のトラッキング解析などがある。このような解析を行う場合、系内に複数の異なる組成を持ったガス（以下、異種ガス）が混在するため、基礎式としてモル数保存式を考慮した特殊なシミュレータが必要となる。

このたび、異種ガスのトラッキングが可能な高速非定常流送シミュレータ「開発コードネーム Cosmos」を開発し、

Win GAIA[®]の一機能としてラインアップしたので報告する。

2. シミュレータの概要

Win GAIA[®]は、エネルギーを考慮した詳細解析用シミュレータと全線温度一定であることを仮定した通常解析用シミュレータの2つを搭載し、大規模ネットワークにおける非定常流送シミュレーションを画期的な高速度で実現している。さらに国内特有の、数百～数千の需要/分岐合流ポイントを持ち、全長数千キロメートルにもおよぶパイプラインネットワークを超大規模系と呼べば、その超大規模系に特化した新スキームの開発にも成功している。

異種ガス対応のシミュレータ Cosmos の開発にあたっては、コンプレッサ・圧力/流量調節弁・ホルダなどの付帯機器が扱えること、小中規模系用のスキームと超大規模系用のスキームを二種類用意していることなど、従来の Win GAIA[®]に搭載されているシミュレータと同等のスペックを有しつつ、高速なトラッキング解析を可能とすることを目標とした。

3. 基礎式 / 構成方程式

まず質量保存則、運動量保存則から基礎式として、密度・流速を主要変数とした (1)式、および、(2)式を得る。本報では簡単のため全線温度一定とし、エネルギー式を考慮しないものとする。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho \cdot u}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} = -(W + g \cdot \sin \phi) \quad \dots\dots (2)$$

ここで、

$$W = 0.5fu|u|/D, \quad f = 4f'$$

ρ は密度、 u は流速、 p は圧力、 t は時間、 x は距離、 W は管摩擦抵抗による加速度、 ϕ は流路勾配、 g は重力加速度、 f は Darcy-Weisbach の管摩擦係数、 D は流路内径、 f' は Fanning の管摩擦係数である。

また、バルブやコンプレッサなどの付帯機器を取り扱う際には、(2)式中の管摩擦抵抗による加速度 W を付帯機器の圧力-流量特性式に変更する。

次に、モル数保存則から基礎式として (3)式を得る。

$$\frac{\partial(\rho/M)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho/M) \cdot u}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 M は平均分子量である。

一般ガス定数 k 、ガス定数 R 、空気のガス定数 R_{air} 、比重(対空気比) G との関係から、

$$\frac{1}{M} = \frac{R_{air}}{k} \cdot \frac{1}{G} = \frac{R_{air}}{k} \cdot H \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 H はガス比重 G の逆数である。

(4)式を (3)式に代入して、

$$\frac{\partial H}{\partial t} + u \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

(5)式は H を変数とした移流方程式の形となっており、Cosmos では (1)式、(2)式に加え、(5)式を基礎式としている。

ガスの状態方程式は (6)式から (9)式に示す Peng-Robinson の式を採用している。

$$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{\alpha(T)}{v^2 + 2vb - b^2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\alpha(T) = 0.457240\{1 + \kappa(1 - \sqrt{T/T_c})\}^2 R^2 T_c^2 / P_c \quad \dots\dots (7)$$

$$\kappa = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2 \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$b = 0.07780RT_c/P_c \quad \dots\dots\dots (9)$$

T は温度、 v は比容積、 T_c は臨界温度、 P_c は臨界圧力、 ω は偏心係数である

乱流摩擦係数 f' は、以下の 8 式から選択するものとする²⁾。

A. G. A. の式：

$$\left. \begin{aligned} \text{Re} \leq T_{\text{Re}} \text{ の時, } \sqrt{1/f'} &= \{4\log(\text{Re}/\sqrt{1/f'}) - 0.6\} \cdot D_r \\ \text{Re} \geq T_{\text{Re}} \text{ の時, } \sqrt{1/f'} &= 4\log(3.7D/\varepsilon) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、

$$T_{\text{Re}} = 1.413(3.7D/\varepsilon)^{1/D_r} \cdot 4\log(3.7D/\varepsilon)$$

ε は管内面粗さ、 Re は Reynolds 数、 D_r はドラッグ係数、 T_{Re} は遷移 Reynolds 数である。

Colebrook の式：

$$\sqrt{1/f'} = 4\log(3.7D/\varepsilon + \sqrt{1/f'} \cdot 1.255/\text{Re}) \quad \dots\dots (11)$$

Panhandle-A の式：

$$\sqrt{1/f'} = 6.87\text{Re}^{0.07305} \quad \dots\dots\dots (12)$$

Panhandle-B の式：

$$\sqrt{1/f'} = 16.49\text{Re}^{0.01961} \quad \dots\dots\dots (13)$$

Weymouth の式：

$$\sqrt{1/f'} = 20.621D^{1/6} \quad \dots\dots\dots (14)$$

Cox の式：

$$\sqrt{1/f'} = 13.291 \quad \dots\dots\dots (15)$$

PolyFlo の式：

$$\sqrt{1/f'} = 5.056\text{Re}^{0.076} \quad \dots\dots\dots (16)$$

Oliphant の式：

$$\sqrt{1/f'} = 12.989(1 + \sqrt{D}/4.781) \dots\dots\dots (17)$$

4. 数値解法

(1)式および(2)式を解く数値解法として、独自に開発した陰的手法である REVISE スキーム¹⁾ および Yamane スキームを採用した。REVISE スキームは中規模系までを、Yamane スキームは大規模 / 超大規模系を対象としている。本章では、Yamane スキームについて述べる。

(3)式に関しては、(1)式、(2)式を解決した後、陰的 CIP 法³⁾ で解決するものとした。Fig. 1 にフロー図を示す。陰的 CIP 法は、移流方程式の時間発展問題に対し、高精度な物理量のプロファイル保存を実現するとともに、任意の時間刻みに対し無条件安定であることを特徴としている。ただし、パイプラインの非定常流送解析に特有な分岐合流部については、オリジナルの陰的 CIP 法の枠内では取り扱えないため、独自の計算モデルを用意している。

Yamane スキームでは、空間方向の離散化にスタッガー

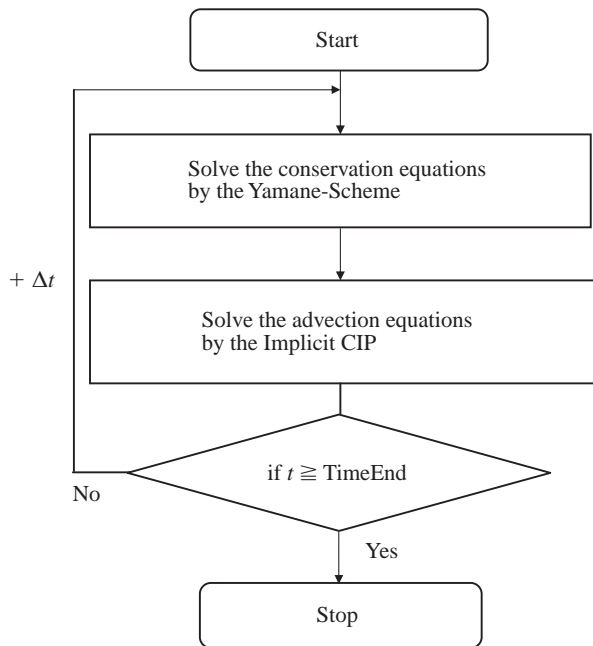


Fig. 1 Flowchart of calculation

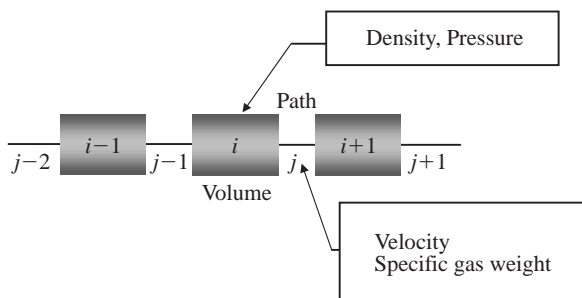


Fig. 2 Staggered mesh

ドメッシュを採用している。

空間方向の離散化イメージを Fig. 2 に示す。パイプを離散化した上で、ヴォリューム要素に密度、圧力を、ヴォリューム間をつなぐパス要素に流速、ガス比重を定義する。

時間方向の離散化には、後退二次差分を用いている。(1)式、(2)式を離散化した式をそれぞれ (18)式、(19)式に示す。簡単のため、時間刻み、距離刻み、管径が一定である場合として記述している。

$$\left. \begin{aligned} \frac{3\rho_i^{n+1} - 4\rho_i^n + \rho_i^{n-1}}{2\Delta t} &= -\frac{\rho_i^{n+1}u_j^{n+1} - \rho_{i-1}^{n+1}u_{j-1}^{n+1}}{\Delta x} (u \geq 0) \\ &= -\frac{\rho_i^{n+1}u_{j-1}^{n+1} - \rho_{i+1}^{n+1}u_j^{n+1}}{\Delta x} (u \leq 0) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (18)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{3u_j^{n+1} - 4u_j^n + u_j^{n-1}}{2\Delta t} + \frac{\rho_{j+1}^{n+1} - \rho_j^{n+1}}{\rho_j^{n+1}\Delta x} + W_j^{n+1} + g \cdot \sin\phi \\ &= -u_j^{n+1} \frac{u_j^{n+1} - u_{j-1}^{n+1}}{\Delta x} (u \geq 0) \\ &= -u_j^{n+1} \frac{u_{j+1}^{n+1} - u_j^{n+1}}{\Delta x} (u \leq 0) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (19)$$

ここで、添え字 n は時間ステップ数、 i はヴォリューム番号、 j はパス番号を表す。

変数をベクトル表示すれば、(20)式の形となる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{2\Delta t}(3\mathbf{U}_j^{n+1} - 4\mathbf{U}_j^n + \mathbf{U}_j^{n-1}) &= \mathbf{G}^{n+1} \\ \mathbf{U} &= (\rho_1, \dots, \rho_i, \dots, u_1, \dots, u_j, \dots)^t \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (20)$$

ここで、ベクトル \mathbf{G} は時間微分項以外の総和を表す。(20)式は非線形であるため、線形化して (21)式に示す Newton 反復式を構成し、収束計算を行う。

$$\left\{ \frac{3}{2}\mathbf{I} - \Delta t \left(\frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{U}} \right)^{(m)} \right\} \Delta \mathbf{U}^{(m+1)} = -\frac{1}{2}(3\mathbf{U}^{(m)} - 4\mathbf{U}^n + \mathbf{U}^{n-1}) + \Delta t \mathbf{G}^{(m)} \dots\dots\dots (21)$$

解の更新は (22)式に従う。

$$\mathbf{U}^{(m+1)} = \mathbf{U}^{(m)} + \Delta \mathbf{U}^{(m+1)} \dots\dots\dots (22)$$

ここで、添え字 m は反復回数を表す。

解が収束すれば、

$$\mathbf{U}^{n+1} \cong \mathbf{U}^{(m+1)} \dots\dots\dots (23)$$

この収束計算は一時間刻み進行するごとに行われる。Yamane スキームでは流速更新量 Δu を消去し、密度のみの反復的に縮退化させることで高速化を図っている。

(21)式で表される線型方程式中に現れる行列は、対象とする解析モデルが直線である場合は帯行列の形となり簡便に解決できるが、分岐合流部を持つ場合は帯行列以外の部分にも非零要素を持つスパース行列となり、解決に工夫が必要となる。パイプラインの流送解析における陰解法系のスキームでは、どのような解法であれ行列の反転が必要であり、計算コストが高くなる要因となっている。REVISE スキームでは、反復解法の一つである BiCGStab 法⁴⁾により行列を反転させていたが、Yamane スキームでは分岐合流部のトポロジーに着目し、独自に開発した直接解法の一つ = 多段階行列縮退化法により解決している。この手法により、超大規模系の場合には BiCGStab 法をそのまま適用した場合に比べ、数倍から数十倍程度 (解析モデルの規模による) の計算高速化を実現している。

新しい時刻の密度、流速を求めた後、(5)式を陰的 CIP 法により解決する。

陰的 CIP 法の詳細については文献³⁾にゆずるが、(5)式中の変数 H の他に H の距離微分をも変数とした上で、距離方向の物理量プロファイルを 3 次スプライン補間することに特徴がある。(5)式を陰的 CIP 法により離散化すれば、

$$\left. \begin{aligned} H_j^{n+1} &= \frac{-\kappa(\kappa+1)\{\kappa g_{\text{jup}}^{n+1} - g_j^n\}D + \kappa^2(\kappa+3)H_{\text{jup}}^{n+1} + (3\kappa+1)H_j^n}{(\kappa+1)^3} \\ g_j^{n+1} &= \frac{(\kappa+1)\{\kappa(\kappa-2)g_{\text{jup}}^{n+1} - (2\kappa-1)g_j^n\} + 6\kappa(H_{\text{jup}}^{n+1} - H_j^n)/D}{(\kappa+1)^3} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (24)$$

$$\begin{aligned} D &= -\Delta x \quad (u \geq 0) \\ &= \Delta x \quad (u \leq 0) \\ g &= \partial H / \partial x, \quad \kappa = -u \Delta t / D \end{aligned}$$

ここで、添え字 jup は流路 j に対する上流側の流路番号を表す。

パイプの内部においては、(24)式により上流側から逐次的に変数を求めることができ、反復計算を必要とせずに陰的な解決が可能となる。ただし、分岐合流部においては複数の流路が存在するため、その近傍に (25)式に示すモル数保存式を適用し、モデル全体としての収束計算を実施する。

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} = \sum_k H_k \cdot Q_k / \text{volume} \dots\dots\dots (25)$$

ここで、 Q は分岐合流部に流入する向きを正とした質量流量、Volume は分岐合流部近傍の幾何容積、添え字 k はある分岐合流部に接続する流路番号である。

5. 解析例

解析例 1：ガスパージ解析

一例として、工事のために遮断された仮想的なパイプライン中に存在する天然ガスを、窒素でパージする状況を解析した。解析モデルの概要を Fig. 3 に、解析結果を Fig. 4 に示す。

ラインを大気圧まで減圧した状態で、計算開始 3 min 後から窒素を $700 \text{ m}^3/\text{N/h}$ で注入するというシナリオの下で、時間刻み 10 s、距離刻みは 20 m、150 のメッシュ数に設定し、40 min のトラッキング解析を実施した。

Fig. 4 は、モデル中の 4 ヶ所の地点における比重変化のトレンドを表したものであり、Point A は窒素の注入ポイント、Point B は中間の分岐部、Point C および D は払い出しポイントである。時間の進行につれ天然ガスが窒素で置換されていく状況が分かる。

以上の解析を、パーソナルコンピュータ (Pentium 4 2.93 GHz) 上で約 0.2 s の解析時間で行うことができた。

解析例 2：オフスペックガスのトラッキング

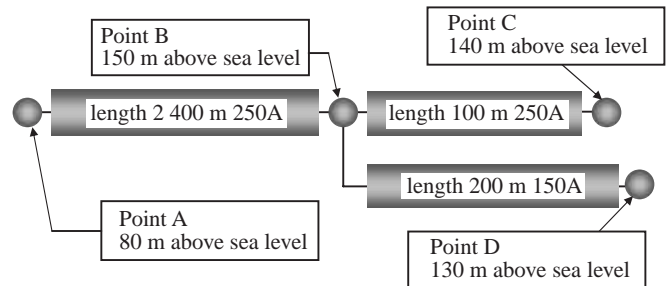


Fig.3 Simulation model

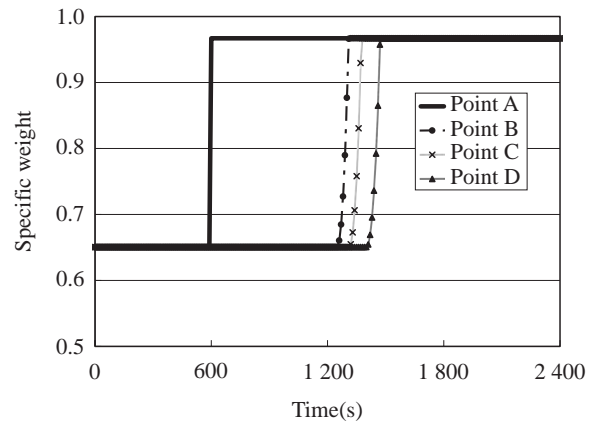


Fig.4 Purging simulation results

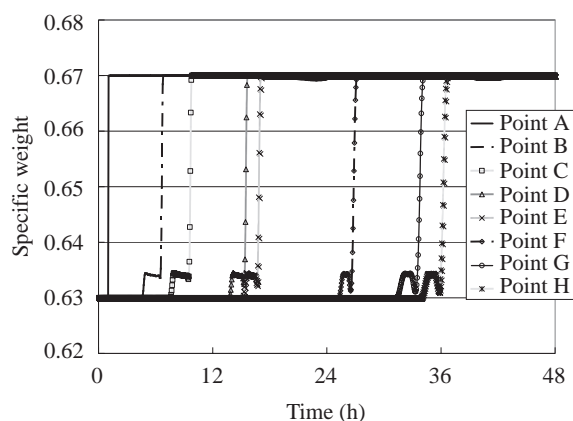


Fig. 5 Tracking simulation results along a branch

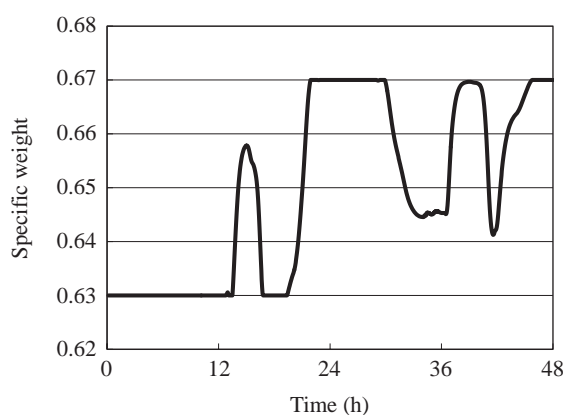


Fig. 6 Tracking simulation results near a junction

一例として、ある仮想的なガスパイプラインネットワークにおいて、運用中にオフスペックガスが混入し、時間とともに伝播していく状況を解析した。解析結果を **Fig. 5** および **6** に示す。

計算に用いたモデルは高圧 / 中圧ラインを含む、全長 2 000 km 以上、需要ポイントと分岐合流部の総数が数千ヶ所の仮想的な超大規模系である。

通常、比重 0.63 のガスで運用されるべきところを、供給基地から比重 0.67 のオフスペックガスが混入したというシナリオの下で、時間刻み 180 s、距離刻みは基本的に約 1 000 m、約 5 000 のメッシュ数に設定し、48 h 分のトラッキング解析を実施した。

Fig. 5 は、モデル中の 8 ヶ所の地点における比重変化のトレンドを表したものであり、Point A から H に向かう方向に下流側となっている。時間の進行につれ、

オフスペックガスが下流に伝播していく状況がわかる。

Fig. 6 は、ある分岐合流部近傍の比重変化のトレンドを表したものである。この分岐合流部では、時間の進行とともに流量、流れ方向が大きく変わる。流れの変動とともにオフスペックガスが到達したり、揺れ戻されたりする状況がわかる。

以上の解析を、パーソナルコンピュータ (Pentium 4 2.93 GHz) 上で約 100 s の解析時間で行うことができた。

6. おわりに

ガスパイプラインネットワークの異種ガストラッキングシミュレータ Cosmos を開発し、シミュレーションシステム Win GAIA[®] の新機能としてラインアップした。本シミュレータにより、全長数千キロメートルにもおよぶパイプラインネットワークにおいても、高速にトラッキング解析が行えることを確認した。

複雑化するガス運用に対し、非常流送解析技術の重要性が日々高まってきている。本シミュレータを内蔵する Win GAIA[®] により、ガスの安定供給にこれまで以上に貢献していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 佐藤律夫, 山根総一郎ほか. ガスパイプライン運転支援システム. NKK 技報, no. 170, 2000, p. 41-47.
- 2) Uhl, A.E. et al. Steady flow in gas pipeline. American Gas Association, 1965.
- 3) Ida, T.; Yabe, T. Implicit CIP method in one dimension. Comput. Phys. Commun. vol. 92, 1995, p. 21-26.
- 4) van der Vorst, H. BICGSTAB, a fast and smoothly converging variant of BiCG for the solution of non-symmetric linear system. SIAM J. Sci. Stat. Compute. vol. 13, no. 2, 1992, p. 631-644.



山根総一郎



佐藤 律夫